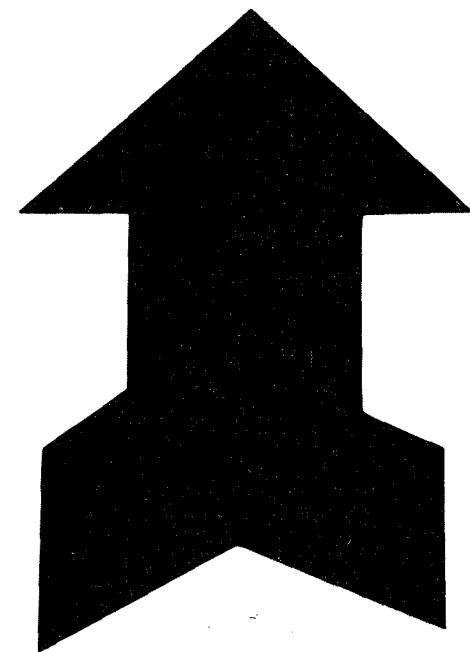


**ÉTUDE
D'UN MODÈLE TOURNANT DE
MER LITTORALE
APPLICATION AU
PROBLÈME DE L'USINE
MARÉMOTRICE DES ILES CHAUSEY**

Communication
présentée au Comité technique
de la Société Hydrotechnique de France
le 8 juin 1967

PAR R. BONNEFILLE *
ET
G. CHABERT-D'HIÈRES **



Introduction

Le problème des marées dans les mers littorales est très complexe car, en plus de la force de frottement, la force de Coriolis due à la rotation de la Terre est loin d'être négligeable et le champ de force de masse ne dérive pas d'un potentiel. Les limites de la zone étudiée ne se ramènent jamais à des formes géométriques suffisamment simples pour permettre une solution analytique du problème. Enfin le mouvement le long des limites fluides est assez mal connu. Nous disposons pour étudier ce problème de deux outils : les modèles mathématiques et le modèle réduit hydraulique. Ce dernier, plus classique, plus empirique, mais mieux connu, donne des résultats plus directement accessibles; il est plus précis et plus fin dans les cas de limites de fond et de contours compliqués.

Les études que nous proposons de présenter ici ont été conduites à l'aide du modèle de la Manche construit par SOGREAH au Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Université de Grenoble pour le compte d'Electricité de France. Leur but était la connaissance de l'influence, sur les mouvements de marées dans toute la Manche, de la construction

des digues et du fonctionnement de l'usine marémotrice des îles Chausey. Elles devaient également apporter, par une connaissance assez exacte de la perturbation de la marée dans le golfe de Saint-Malo, les éléments nécessaires au réglage des modèles de détail à plus grande échelle. Nous ne donnerons ici qu'un bref résumé de la description du modèle de la Manche et de la plaque tournante qui le supporte. On pourra trouver l'essentiel de renseignements utiles dans les publications de : J. Dalverny et P. Fontanet [1] et G. Chabert-d'Hières [2].

Le modèle et son réglage

Le modèle.

Les caractéristiques essentielles du modèle sont (fig. 1) :

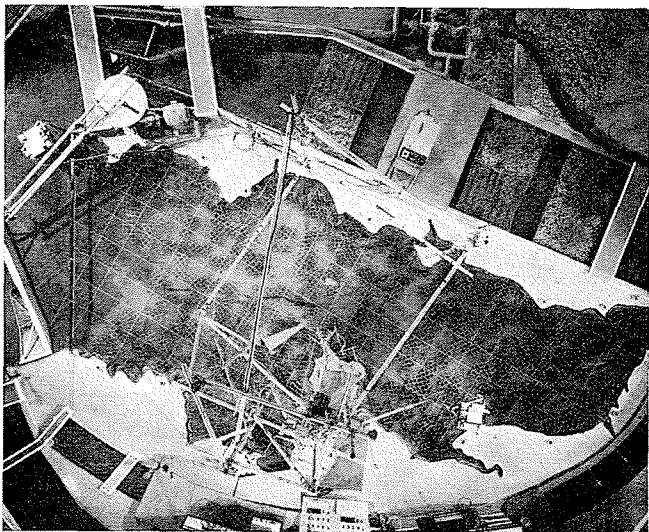
- échelle en plan..... 1/50 000
- échelle verticale..... 1/500

La similitude de Froude donne alors 1/22,3 pour l'échelle des vitesses; on doit imposer au modèle une rotation de 1 tour en 50,4 s pour représenter la force de Coriolis due à la composante verticale de la rotation terrestre, pour la latitude moyenne de 49°.

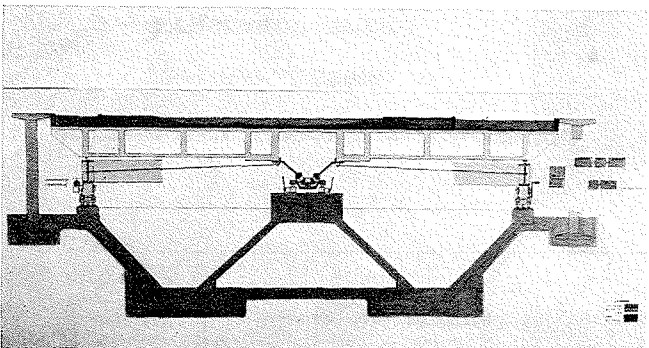
La distorsion très forte a contraint à représenter les forces de frottement du fond par une rugosité très importante étendue à toutes les couches du fluide pour conserver une bonne répartition des vitesses le long d'une verticale.

* E.D.F., Direction des Etudes et Recherches, 6, quai Watier, 78 - Chatou.

** Ingénieur au C.N.R.S., Chef de la Section d'Etude des marées du Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Université de Grenoble.



1/ Vue générale du modèle.
General view of the model.



2/ Coupe schématique de la plaque tournante.
Diagrammatic turntable cross-section.

Pour éliminer les effets de la force centrifuge, la surface de référence des fonds est un paraboloïde de révolution.

Seule l'onde induite par la marée océanique est reproduite sur le modèle; lors de l'étalonnage du modèle et des essais de l'usine marémotrice des îles Chausey, seules étaient représentées les marées périodiques, sinusoïdales à l'entrée de la Manche, d'amplitude $M_2 + S_2$ et $M_2 - S_2$ et de période 12 h 25, soit 20 s sur le modèle.

Le générateur de marée à la limite Atlantique fonctionne comme une porte pivotant autour d'un axe vertical et entraîné par un système bielle-manivelle. Un absorbeur constitué d'un canal en quart d'onde amortit l'onde réfléchie par les fonds de la Manche; il absorbe également les perturbations créées par les ouvrages à construire. Au Pas-de-Calais, un deuxième canal du même type permet à l'aide d'une réflexion convenable de l'onde de marée, de représenter l'onde issue de la mer du Nord.

La plateforme tournante.

Le modèle est monté sur une plate-forme tournante qui doit tourner d'un mouvement circulaire uniforme aussi parfait que possible autour d'un axe vertical.

Les caractéristiques principales de la plaque tournante (fig. 2) sont :

- poids 300 t environ;
- surface 150 m²;
- mouvement horizontal et plan à $\pm 0,01$ mm, vitesse de rotation moyenne sur un tour constante à 2.10^{-4} près;

Les seuls inconvénients sont des variations de vitesse sur $1/20^\circ$ de tour pouvant atteindre 10^{-3} fois la vitesse moyenne. Actuellement, des essais sont en cours pour améliorer ce dernier point en éliminant les irrégularités du couple de frottement.

La plaque se compose d'une dalle formée de hourdis en béton armé de 80 cm d'épaisseur. La vue en plan est un polygone de 20 côtés inscrit dans un cercle de 14 m de diamètre. Elle est supportée par un pivot central et par 12 galets dont 6 sont moteurs. Les galets, coniques réglés de façon à ce que leurs sommets coïncident avec l'axe de la pivoterie et que leurs génératrices supérieures soient situées dans le même plan, supportent un chemin de roulement en acier, lié à la plaque, de 12 m de diamètre et de 600 mm de haut, matérialisant un plan parfait.

L'étalonnage et ses résultats.

L'étalonnage du modèle était conduit en prenant pour critère les marnages, les autres paramètres de la marée étant vérifiés *a posteriori*. Il fut effectué pour le coefficient de marée 95 environ; plus précisément, on réglait le générateur d'ondes de façon à maintenir constamment égale à 10,75 m l'amplitude à Saint-Malo, choisi arbitrairement.

Amplitudes.

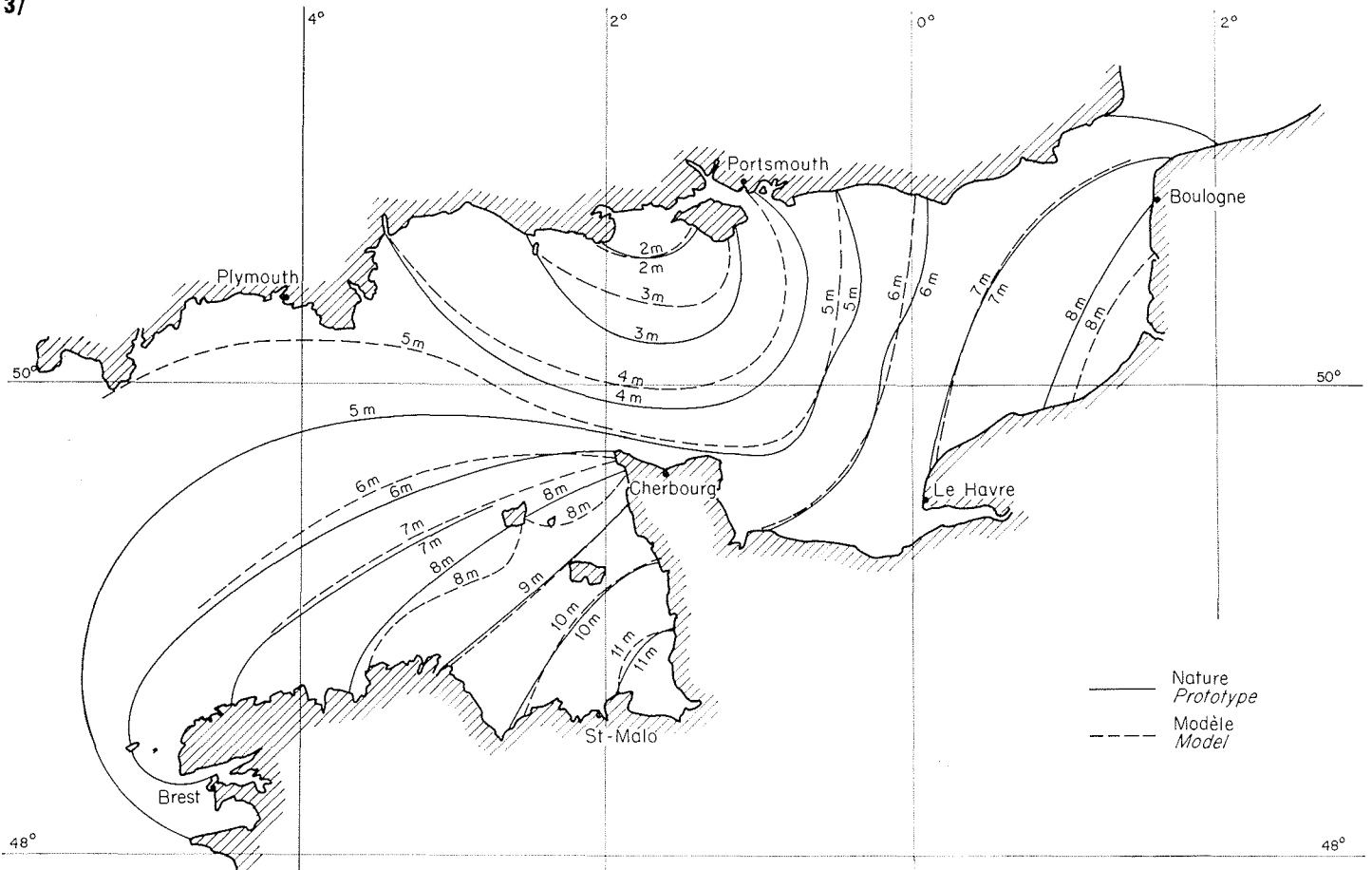
Dès les premières mesures, les amplitudes en chaque point du modèle se sont révélées correctes à 15 % près. La rugosité était alors la rugosité théorique et les canaux des limites n'étaient pas réglés. Les opérations de réglage peuvent être résumées de la façon suivante :

- légère diminution globale de la rugosité, ce qui a supprimé un déficit de marée sur les côtes de Picardie;
- réglage du canal du Pas-de-Calais de façon que l'onde réfléchie réduise le minimum des marnages le long des côtes anglaises à la bonne valeur (1,7 m) et le place convenablement à Christchurch;
- réglage de l'absorbeur côté Atlantique de façon que son coefficient de réflexion soit minimal. Le critère employé était rendre minimal le déphasage entre le courant sortant du modèle et le maximum de la dénivellation de la surface libre, et cela en tous les points d'une ligne à peu près confondue avec le parallèle de Lands End;
- enfin, quelques ajustements locaux de la rugosité (baie de Seine, Raz Blanchart principalement).

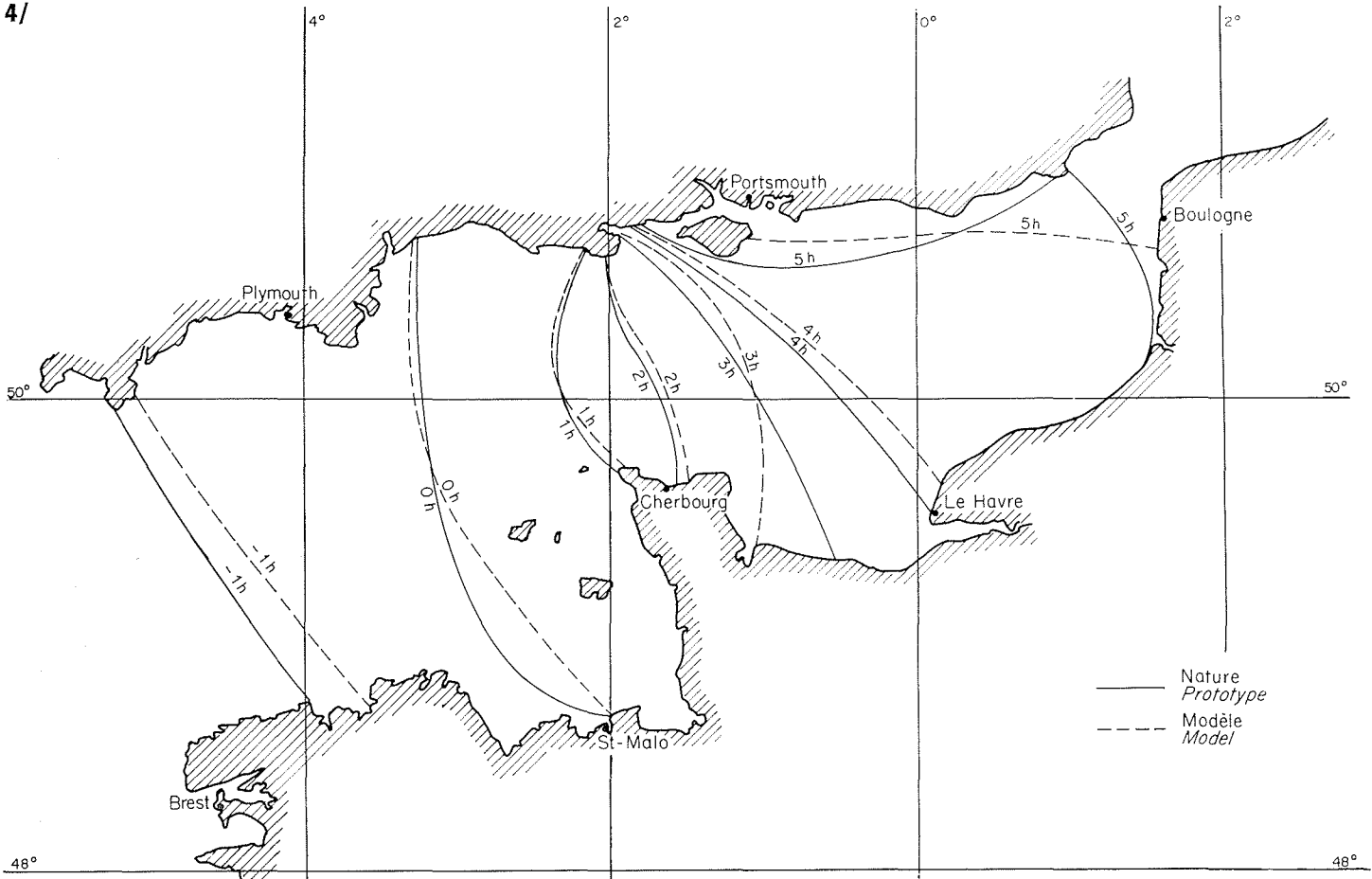
Ces opérations étaient compliquées du fait de leurs interactions, mais on a pu assez facilement procéder par approximations successives et aboutir en quelques mois aux résultats présentés ci-après de façon très condensée.

Les lignes d'égale marnage (fig. 3) montrent que, sur les côtes, les écarts avec les valeurs de la marée $M_2 + S_2$ mesurées dans la nature sont très faibles et inférieurs à 1 %, sauf le long des côtes de Picar-

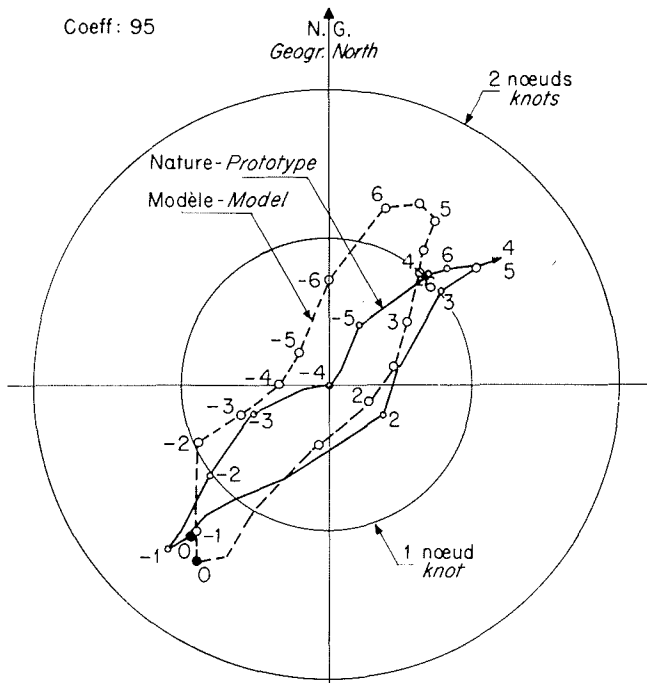
3/



4/

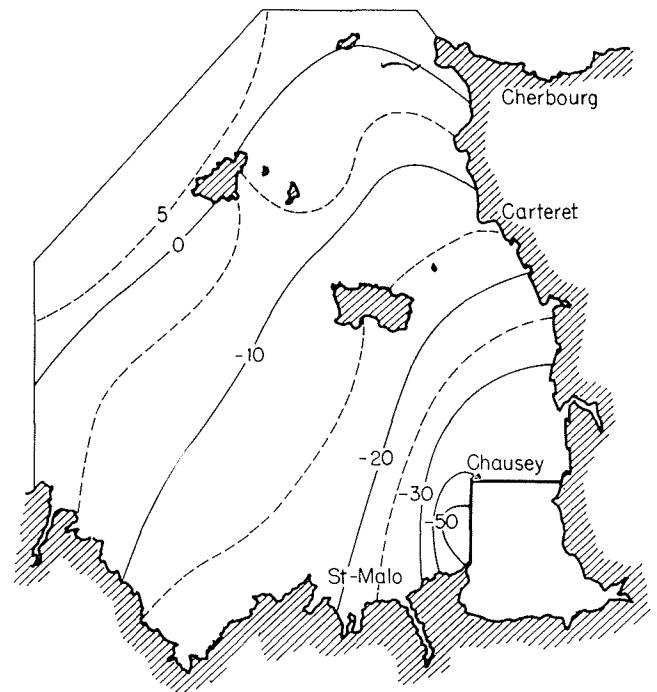


3 et 4/ Lignes d'égal marnage. Comparaison modèle-nature / Co-tidal lines. Comparison between model and real life data.



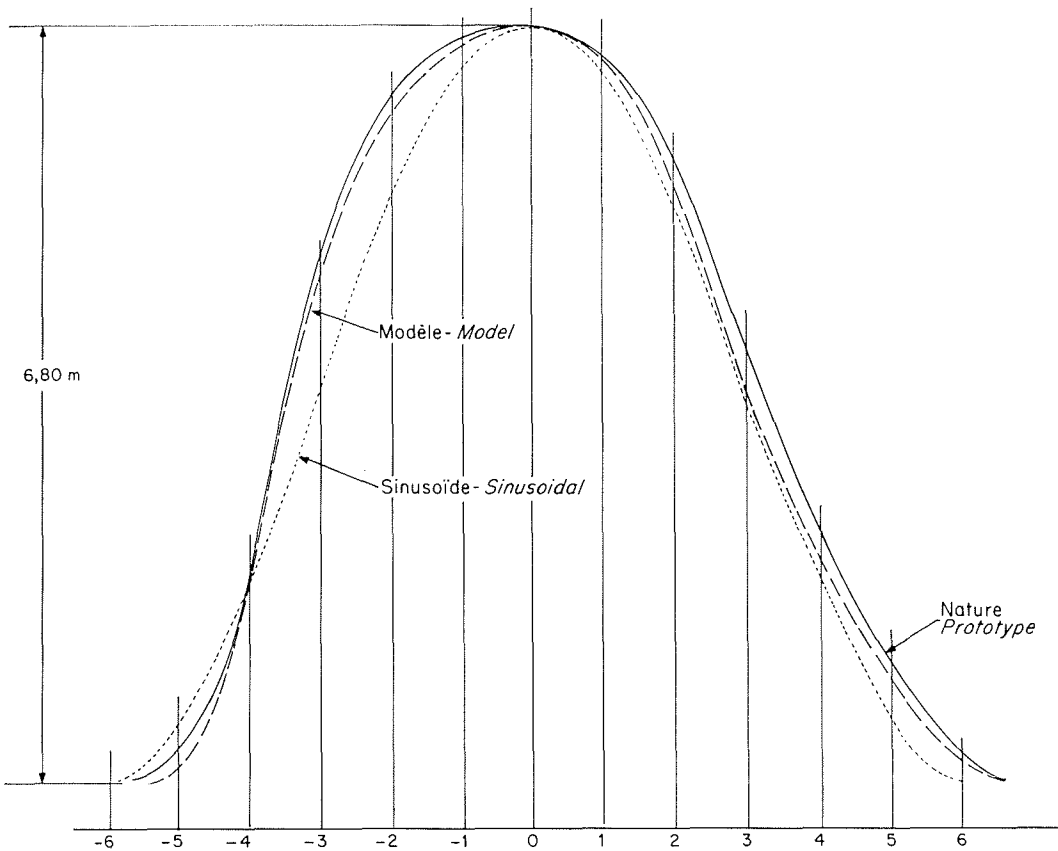
Les courbes sont graduées en heures - Curves in hours.

5/ Rose de courant dans la Manche orientale. Comparaison modèle-nature.
Model and real life currents in the eastern Channel.



Courbes cotées en cm - Curves in centimetres.

7/ Perturbation due aux digues dans le golfe de Saint-Malo.
Disturbance due to dykes in Saint-Malo bay.



6/ Courbe de marée au Havre. Comparaison modèle-nature.
Tide curve at Le Havre. Comparison between model and real-life data.

Application à l'étude de l'usine marémotrice des îles Chausey

die, où il reste un déficit de 5 %, environ, et vers la côte sud de Cornouailles, où persiste un excédent de 20 cm, soit un écart de 5 % également. Loin des côtes, les écarts semblent plus grands, mais restent compatibles avec la précision du tracé des courbes « nature », établies à partir des courants mesurés.

Phases.

Les lignes d'égale phase (fig. 4) ou cotidales sont également en très bon accord avec les heures de la marée type de vives eaux moyennes. La convergence des lignes au nord de l'île de Wight fait bien apparaître le point amphidromique virtuel. Les écarts maximaux sont de l'ordre de 10 mn, ce qui est déjà excellent. Seul, vers Arromanches, un écart local de 20 mn reste inexpliqué.

Roses de courant.

Les courants sont beaucoup plus difficiles à mesurer, autant sur le modèle que dans la nature (fig. 5). La méthode des flotteurs photographiés à intervalles de temps réguliers donne 10 à 15 % de précision sur les vitesses et une dizaine de degrés sur les directions; de plus, le flotteur peut être déphasé par rapport au mouvement de l'eau. Toutefois, en un grand nombre de points, nous avons obtenu de bonnes roses de courants telles que celle présentée relative à la Manche orientale.

Forme de la marée dans chaque port (fig. 6).

Nous donnons à titre d'exemple la marée du Havre très caractéristique avec sa tenue du plein. L'analyse harmonique donne, pour les 3 premiers harmoniques, pour la courbe nature, respectivement : 7,08, 0,97 et 0,81 m, et pour le modèle : 7,20, 0,76 et 0,50 m. La concordance est déjà excellente; de plus, nous avons pu montrer par des essais récents qu'il se produit une résonance du troisième harmonique dans l'embouchure de la Seine. De ce fait, une faible composante à l'entrée de la Manche, de période $(12\text{ h }25'/3) = 4\text{ h }08$, peut expliquer l'écart résiduel noté sur cette composante. Malgré la forte distorsion, le modèle représente bien la forme de la courbe de la marée en fonction du temps.

Les essais en cours semblent montrer que la propriété citée ci-dessus est valable pour l'ensemble de la Manche. Les cartes nature et modèle des deux premiers harmoniques, de période 6 h 12 et 4 h 08 résultant de l'analyse harmonique des courbes de période 12 h 25, coïncident assez bien en tous les points. Cette comparaison fera l'objet d'autres publications. Cette propriété très intéressante du modèle peut permettre d'apporter une aide considérable dans l'analyse des courbes de marée, et dans la méthode harmonique de prévision.

Conclusion sur le réglage.

L'étalonnage du modèle a été vérifié également pour la marée périodique $M_2 - S_2$ de période de 12 h 25 : les écarts sont les mêmes en valeur absolue que pour M_2 et S_2 . Le modèle possède donc encore un excellent réglage à faible amplitude, ce qui permet de l'utiliser pour les marées intermédiaires et même l'utiliser pour toutes les amplitudes possibles dans la nature.

Définition du problème.

Les caractéristiques essentielles de l'usine marémotrice projetée dans la baie du Mont Saint-Michel sont les suivantes : longueur des digues 30 km, puissance installée 10 000 MW. Sa présence modifie la forme du golfe de Saint-Malo, le convergent offert à l'onde de marée étant tronqué par la digue. Van Troys [3] avait évalué à 50 cm la modification de l'amplitude et à une demi-heure le déphasage de l'onde résultant de la présence de l'usine.

Si on tient compte à la fois des modifications du tracé des côtes et de la puissance captée par l'usine, la perturbation peut être importante. L'énergie mise en jeu n'a aucune mesure avec celle perdue par frottement actuellement dans l'emprise des digues; elle est de l'ordre de la moitié de l'énergie active entrant dans le golfe de Saint-Malo.

Cette ponction d'énergie aurait d'ailleurs d'autant plus d'influence si l'augmentation des marées au Mont Saint-Michel était due à un phénomène de résonance. Heureusement, les grandes amplitudes sont dues essentiellement à un phénomène de réflexion de l'onde contre les côtes du Cotentin, accompagné d'une diffraction importante autour du cap de la Hague (cf. H. Lacombe [4] et R. Bonnefille [5]), auxquels s'ajoute l'effet de la force de Coriolis due à la rotation terrestre. De plus, le convergent formé par les côtes et les fonds, malgré des frottements importants, joue un rôle non négligeable.

Etude du remous des digues.

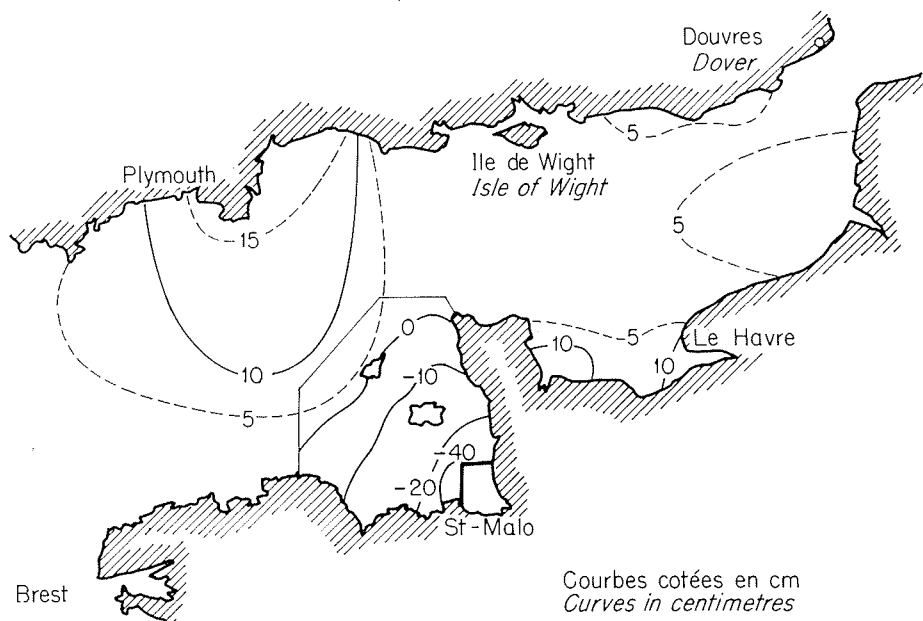
L'emprise de l'usine est définie par le parallèle des îles Chausey et une ligne droite de Chausey à la Pointe du Grouin (fig. 7).

Les mesures de l'action des digues seules furent effectuées avec grande précision et répétées souvent. La fidélité des mesures permet le tracé des lignes d'égale perturbation de 5 en 5 cm (0,1 mm sur le modèle).

La perturbation se réduit à une onde qui se propage dans le divergent du golfe de Saint-Malo et se réfléchit sur les côtes anglaises (fig. 8). La ligne nodale se situe à la limite du golfe de Saint-Malo. Il faut noter qu'une modification locale du domaine entraîne une perturbation sensible de l'onde en des points très éloignés. Le maximum du déficit de marée est de 50 cm pour les vives eaux moyennes; il est proportionnel au coefficient et vaut environ 4,5 % de l'amplitude de l'onde à Chausey. Aucun déphasage de l'onde de marée n'a pu être décelé.

Fonctionnement de l'usine.

Nous ne décrivons pas en détail la représentation technologique de l'usine. Le transit d'énergie à travers la digue était simulé en imposant, à chaque instant, entre la Pointe du Grouin et Chausey, un débit sinusoïdal. Cette représentation très schématique implique, avec la forme géométrique du bassin et les caractéristiques des groupes fonction-



8/ Perturbation due aux digues dans la Manche entière.

Disturbance due to dykes throughout the Channel.

nant à double effet, un fonctionnement rigoureusement périodique illustré par la figure 9.

Le fonctionnement présenté sur la figure 9 est défini par :

- un débit maximal de 200 000 m³/s, variant sinusoïdalement;
- l'amplitude de la marée égale à celle de vives eaux moyennes;

il est rendu optimal en prenant :

- le maximum du débit sortant du bassin en retard de 6 h 12 sur l'heure de la pleine-mer;
- le niveau maximal dans le bassin égal à 10 m au-dessus du zéro des cartes marines.

On a supposé :

- la marée non perturbée;
- la ligne d'eau horizontale le long de la digue côtés mer et bassin;
- le débit partagé de façon égale entre 800 groupes type Rance de caractéristiques données.

La perturbation pour le fonctionnement correspondant à l'exemple précédent, est tracé sur la figure 10. Le réseau de courbes des lignes d'égal écart de marnage a une forme très voisine de celle des lignes d'égal marnage (fig. 3). La figure 10 représente un essai avec une marée de vive eau mais, en première approximation, l'amplitude de la marée joue peu sur la perturbation.

Le tracé des réseaux pour toute la Manche, pour 12 déphasages différents d'heure en heure, entre le débit sortant et la marée, pour quatre équipements d'usines correspondant à 100 000, 200 000, 300 000 et 400 000 m³/s et pour deux amplitudes de marées, vive eau et morte eau, ne permet pas de déceler des écarts de phase de la marée; la perturbation, si on retranche celle des digues seules, est une fonction sensiblement linéaire du débit.

L'influence du déphasage est clairement montrée sur la figure 11. La perturbation maximale a lieu pour le déphasage 7 h différent de 1 h de celui du régime de production maximal. Elle correspond à une diminution de marée de 1 m : 50 cm provenant de la modification du tracé des côtes et 50 cm de la ponction d'énergie. Pour un débit maximal de

400 000 m³/s, l'écart dû à la ponction d'énergie est de 1 m, d'où, compte tenu de l'influence de la digue, un affaiblissement total de la marée de 1,50 m.

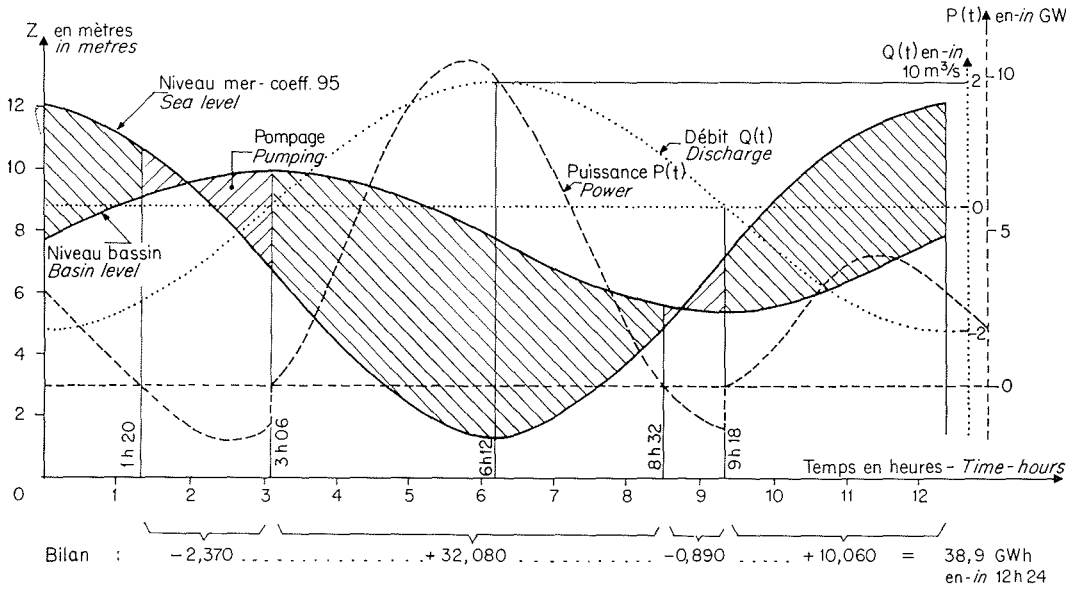
La perte d'énergie disponible due au remous est considérable (fig. 12) pour l'exemple présenté ci-dessus (fig. 10), le remous diminue la production d'énergie par période de marée de 39 à 35 GWh.

Conclusion

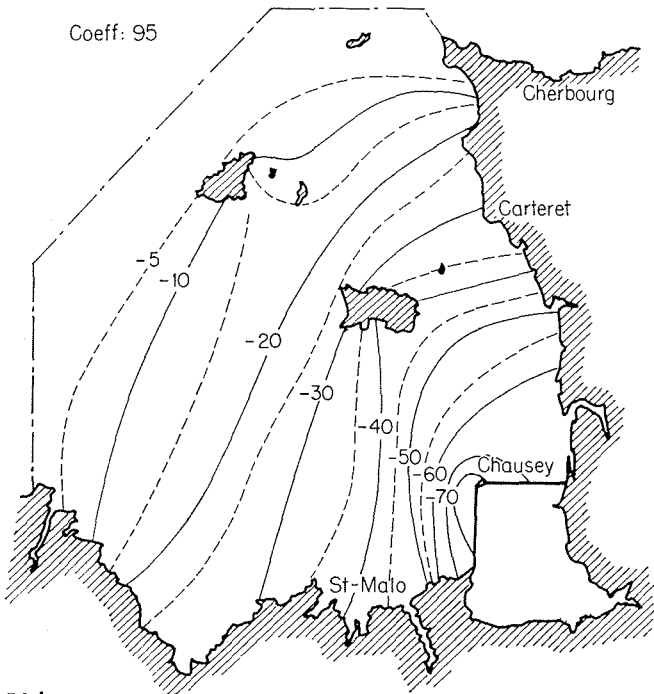
Les résultats de l'étalonnage du modèle réduit de la Manche illustrent la grande sensibilité et la grande précision de cet outil, malgré les servitudes mécaniques et hydrauliques auxquelles il est assujéti. En dehors de l'étude de l'usine marémotrice des îles Chausey résumée ici, le modèle a été utilisé pour l'étude de la diffusion de solutions par les courants de marée. Rappelons enfin ses possibilités de reproduction des harmoniques de la marée, ce qui pourrait apporter aux ingénieurs hydrographes une aide précieuse pour l'analyse des courbes de marée réelles, surtout lorsque les enregistrements des marées naturelles sont trop brefs et lorsque la marée se propage par petits fonds.

Bibliographie

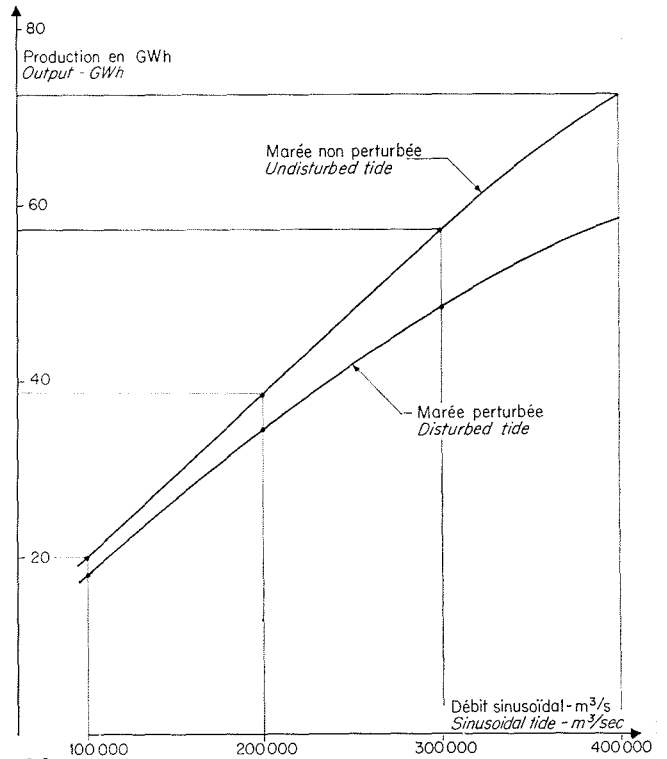
- [1] P. FONTANET et J. DALVERNY. — *La Houille Blanche*, n° 5 (1959), p. 598.
- [2] G. CHABERT D'HIÈRES. — *Mémoires et Travaux de la S.H.F.*, suppl. au volume I (1962), p. 130.
- [3] L. VANTROYS. — Le remous d'un ouvrage dans une mer à marée. Thèse présentée à la Faculté des Sciences de Paris, série A, n° 3 123. *Imprimerie Nationale*. Paris (1958).
- [4] H. LACOMBE. — *Mémoires et Travaux de la S.H.F.*, *La Houille Blanche*, n° B (1955).
- [5] R. BONNEFILLE. — Contribution théorique et expérimentale à l'étude du régime de marée. Thèse (à paraître).



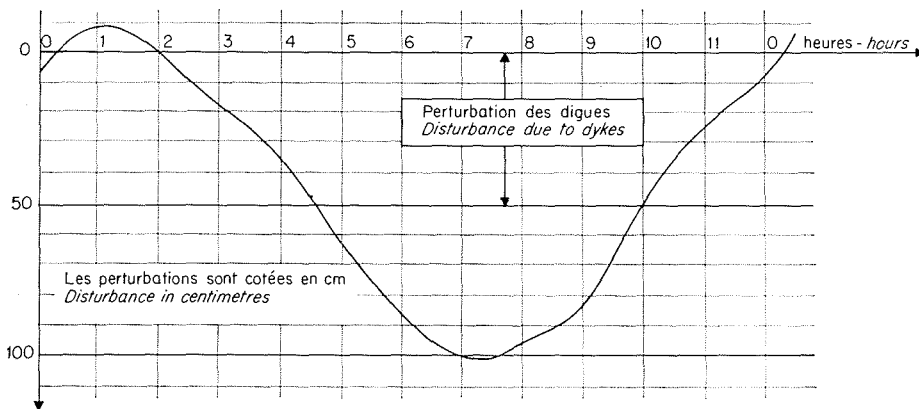
9/ Schéma de fonctionnement de l'usine.
Power plant operating chart.



10/



12/



11/

10/ Perturbation due au fonctionnement de l'usine à 200 000 m³/s.
Disturbance due to power plant operation at 200 000 m³/s.

11/ Perturbation totale au voisinage de l'usine en fonction du déphasage entre le débit et la marée (Q=200 000 m³/s).
Total disturbance near the power plant vs. phase difference between discharge and tide (Q = 200,000 m³/s).

12/ Effet de la perturbation sur la production de l'usine.
Effect of tide disturbance on power plant output.

Discussion

Président : M. BANAL.

N.B. — Le texte de la communication tient compte des derniers résultats obtenus sur le modèle, la veille même de la présentation du mémoire.

M. GOHIN souligne les très intéressantes informations apportées par M. CHABERT D'HIÈRES sur l'importance de l'harmonique 2 de la marée M2. La SOGREAH et lui-même souhaiteraient recevoir des indications complémentaires sur ce point (en particulier sur l'amplitude de l'onde additionnelle A4 introduite à la limite du large).

M. CHABERT D'HIÈRES préfère remettre sa réponse à une date ultérieure afin de disposer de l'ensemble des résultats avec plus de précision.

M. GOHIN rappelle qu'il n'est malheureusement pas possible d'introduire, à la limite du large, la marée réelle, car celle-ci n'est connue qu'aux abords immédiats de la côte.

M. BONNEFILLE rappelle que le premier modèle de la Manche date d'une douzaine d'années. Le « batteur » générateur de marée, d'abord situé à l'entrée de la Manche, avait donné une certaine courbe de marée. Son déplacement, assez loin de l'emplacement initial, a conduit à une modification importante de la courbe de marée, ce qui confirme que les effets des harmoniques sur cette zone ne sont pas négligeables.

M. GOHIN ajoute que la SOGREAH, dans son modèle mathématique de la Manche, obtenait des lignes équiremous très proches de celles signalées dans la communication.

M. KRAVTCHEKO demande jusqu'où s'étend la courbe de remous et quelle peut être l'interaction entre l'usine et les frontières du modèle.

M. BIESEL fait remarquer que la limite sur laquelle le « remous » s'annule ne marque pas la limite des interactions, car un nœud d'amplitude est généralement accompagné par un ventre de courants dans les phénomènes d'onde. Il rappelle que, sur le modèle physique, on avait

observé une sorte de puissance limite de l'ordre de 10 millions de kW en deçà de laquelle la perturbation semblait rester localisée et ne pas atteindre les limites du modèle. Cependant, pour trancher la question, il faudrait faire un modèle hydraulique avec des batteurs imposant complètement les vitesses aux limites, et comparer avec les résultats obtenus sur le modèle actuel de la plaque tournante de Grenoble, qui a des conditions aux limites plus sophistiquées. Il n'y aurait d'ailleurs peut-être pas de différences très sensibles.

M. CHABERT D'HIÈRES pense, au contraire, qu'il pourrait y avoir des différences, car les lignes de 0 trouvées, pour n'importe quel fonctionnement, vont très loin.

M. GOHIN signale que l'étude du remous nécessite un temps de calcul trois à quatre fois plus élevé que l'étude de la marée naturelle.

M. THIRRIOT demande ce que l'on peut dire de la comparaison entre les résultats d'expérience sur modèle fixe et sur modèle tournant.

M. CHABERT D'HIÈRES dit que les lignes cotidales sont, sur un modèle fixe, presque parallèles, alors que, sur un modèle tournant on voit cet ensemble de lignes converger vers l'île de Wight. La distribution des amplitudes est également très affectée par la rotation. M. BONNEFILLE précise que, sur le modèle fixe, on n'a pas pu obtenir la différence de marnage observée, en nature, entre la côte anglaise et la côte française; toutefois, cette différence n'est pas due uniquement à la rotation de la Terre, mais également au frottement sur le fond.

M. BANAL clôt la discussion par les deux remarques ci-après :

— pour l'usine marémotrice de Chausey, on a évalué à 15 % la valeur économique de la perte de production d'énergie électrique provoquée par la réduction de marée, résultant de l'existence et du fonctionnement des ouvrages. Cette perte n'est pas négligeable et justifie *a posteriori* les études qui ont été entreprises pour l'évaluer;

— l'étude du projet des îles Chausey est actuellement arrêtée, mais M. le Président BANAL souhaite que toutes les informations rassemblées à cette occasion sur la connaissance de la marée dans la Manche et sur l'ensemble du problème soient publiées en totalité, afin que toutes ces études puissent être connues des spécialistes et contribuent aux progrès de la science sur ce point.

Abstract

**Design of a rotating model of a coastal sea area
Its application to the Chausey Islands tidal power plant**

by R. Bonnefille * and G. Chabert d'Hières **

The leading particulars of the hydraulic scale model of the Channel built on the Grenoble turntable are reviewed and a summary is presented of coastal tide reproduction data for ocean-induced periodic waves. The results are given for average spring tides, with wave height and phase errors of about 1 % and 10 mn respectively. The resulting current directions are fairly similar to those observed on the spot. The curves giving water level variation with time clearly show up the effect of shallow water, in spite of the very distorted model scale. The Le Havre tide curve is a good example.

The main results of the Mont Saint-Michel tidal power project study are then stated, i.e. the effect of the dykes and power house operation on the tide ranges. This study considered the use of the power units to store and produce energy, for various installed output levels and tide coefficients. Backwater effects due to the structures are found to cause an appreciable loss of energy.

* E.D.F., Direction des Etudes et Recherches, 6, quai Watier, 78 - Chatou.

** Ingénieur au C.N.R.S., Chef de la Section d'Etude des marées du Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Université de Grenoble.